

УДК 539.3

**А.И.Мажейка, проф., канд.техн.наук., А.Б.Чайкоский, доц., канд.техн.наук,
С.И.Маркович, доц., канд.техн.наук**

Кировоградский национальный технический университет,

А.Н.Лутай, ст. преп.

Национальный технический университет Украины «КПИ»

Деформирование монолитных железобетонных конструкций на упругом основании с учетом ползучести бетона

В статье рассмотрены вопросы применения крупногабаритных строительных железобетонных конструкций. Предложена методика расчета плит и фундаментов с учетом деформативности строительных элементов, проведен расчет коэффициента армирования фундаментной плиты для здания АЭС.

монолит, фундамент, методика, элемент, расчет, напряжение, сжатие, ползучесть, критерий разрушения, арматура

Современное строительство гидротехнических и атомных энергетических сооружений отличается крупными габаритами строительных конструкций в виде железобетонных плотин и зданий из монолитного железобетона, поэтому основной расчетной нагрузкой является собственный вес этих конструкций. Одними из основных несущих и ответственных элементов, применяемых в строительстве являются железобетонные блоки, пластины и балки, которые работают совместно с основаниями. Монолитные сплошные фундаменты и плиты на упругом основании относятся к таким ответственным сооружениям, как здания тепловых и атомных электростанций. Крупногабаритные гидротехнические конструкции и конструкции зданий атомных энергетических станций являются наиболее материалоемкими и дорогостоящими сооружениями с повышенной ответственностью [1].

Расчет плит перекрытий и фундаментов проводится с учетом трех стадий напряженно-деформированного состояния в зоне изгиба железобетонного элемента при постепенном увеличении нагрузки: *стадия I* – при малых нагрузках напряжения в бетоне и арматуре таковы, что деформации принимаются упругими с линейной зависимостью от напряжений, а железобетон принимается однородно деформируемым; *стадия II* – нагрузка такова, что в растянутой зоне образуются трещины и растягивающие усилия, которые воспринимаются арматурой и участком бетона сжатой зоны; *стадия III* (стадия разрушения) – напряжения в арматуре достигают предела текучести, сокращается высота зоны сжатия и наступает раздробление зоны сжатия.

Методы расчета зависят от стадии напряженно-деформируемого состояния. На второй стадии расчет ведется по допускаемым напряжениям, определяемым в первой стадии. Метод расчета по разрушающим усилиям исходит из третьей стадии напряженно-деформированного состояния, вместо гипотезы плоских сечений применяются принципы пластического разрушения, когда напряжения в арматуре и бетоне достигает предельных значений одновременно. Основной является первая стадия, которая и рассматривается в данной работе.

Целью работы являлось разработка уточненного расчетно-экспериментального метода определения деформативности крупногабаритных элементов железобетонных конструкций на упругом основании с учетом ползучести и старения бетона.

В работе нами рассмотрены модели деформирования грунтовых оснований как для скальных, так и нескальных пород и установлено, что практические методы расчета конструкций на грунтовом основании, рекомендованные СНиП 2.02.01-83, позволяют легко адаптировать модификацию кинетического варианта теории ползучести [1] применительно к расчету железобетонных монолитных конструкций на упругом основании.

Было определено, что расчетные схемы для исследования процессов деформирования крупногабаритных монолитных железобетонных конструкций на упругом основании с учетом ползучести бетона могут быть построены на основе математических моделей, используемых при расчетах анизотропных плит средней толщины.

Установлено, что надлежащий выбор постоянных в уравнениях кинетической теории ползучести с вырожденными ядрами относительно приведенного времени, обеспечивает любые реально измеряемые скорости ползучести при $\eta \rightarrow 0$. Предлагается математическое обоснование применимости кинетической теории ползучести и разрушения, предложенной в работе [1], к бетону, по которому определяются функции старения и ползучести. В ней зависимость модуля упругости E и предельной деформации ε_{∞} от возраста учитывается через «свободный объем» - объемную деформацию, зависящую от усадки и старения бетона и определяемую непосредственно в экспериментах.

Наиболее характерной особенностью ползучести бетона является быстро нарастающая деформация сразу после приложения нагрузки, которую не описывает сколько-нибудь удовлетворительно ни одна из известных теорий ползучести. В кинетической теории приведенное время автоматически обеспечивает необходимый характер изменения быстро нарастающих деформаций, что следует из физических предпосылок этой теории. Непрерывная зависимость деформации от возраста вводится естественно как зависимость плотности бетона от возраста через приведенное время.

Железобетонные конструкции не принято рассчитывать по допускаемым напряжениям, поскольку зависимость напряжений от деформаций в бетоне существенно нелинейна. Поэтому железобетонные изделия рассчитывают по предельным состояниям, причем в зоне сжатия $\sigma = R_e$, а в зоне растяжения $\sigma = 0$. Наличие трещин допускается, если приняты меры, предупреждающие коррозию арматуры. В малой окрестности вершины трещины в бетоне можно ввести критерий разрушения [2]

$$\frac{\delta}{d} = 8(1 - \nu^2) \frac{R_{et}}{E_e}, \quad (1)$$

где E_e - модуль упругости бетона;

δ - раскрытие трещины длиной d .

При этом $\delta/d = \tan \varphi$, где φ определяет угол наклона эпюры растягивающих напряжений. Коэффициент армирования определяется как

$$\mu = \frac{A_s}{(n - a)b}, \quad (2)$$

где A_s - площадь арматуры;

b - толщина сечения;

n - высота,

a - определяется из условия

$$a \geq \left[\frac{1 + (d_s/2a)^2}{1 - (d_s/2a)^2} \nu_s \frac{E_s N}{E_s R_{et}} \right], \quad (3)$$

где d_s - диаметр арматурой проволоки;

ν - коэффициент Пуассона бетона;

E_s - модуль упругости арматуры.

Площадь арматуры определяется из условий равновесия в сечении, откуда

$$A_s = \epsilon [R_e (Z_1 + Z_0 / 2) - R_{et} Z_2 / 2] / R_s$$

$$Z_1 = \frac{N - (R_e + R_{et})(Z_0 - Z_2)\epsilon / 2}{R_e \epsilon} \quad (4)$$

Формулы (5)-(7) отражают особенности расчета железобетонных элементов конструкций с учетом наличия арматуры, которая увеличивает стоимость железобетонных изделий. В реальных условиях стоимость железобетонных изделий близка к оптимальной при следующих условиях

$$\mu = 0,01 \div 0,02, \quad x / h_0 = 0,3 \div 0,4 \quad \text{для балок}$$

$$\mu = 0,003 \div 0,006, \quad x / h_0 = 0,1 \div 0,15 \quad \text{для плит}$$

В атомной энергетике основные сооружения отличаются большими размерами и материалоемкостью (рис.1) [1]. Они состоят из монолитного железобетона и возводятся непосредственно на грунтовом основании.

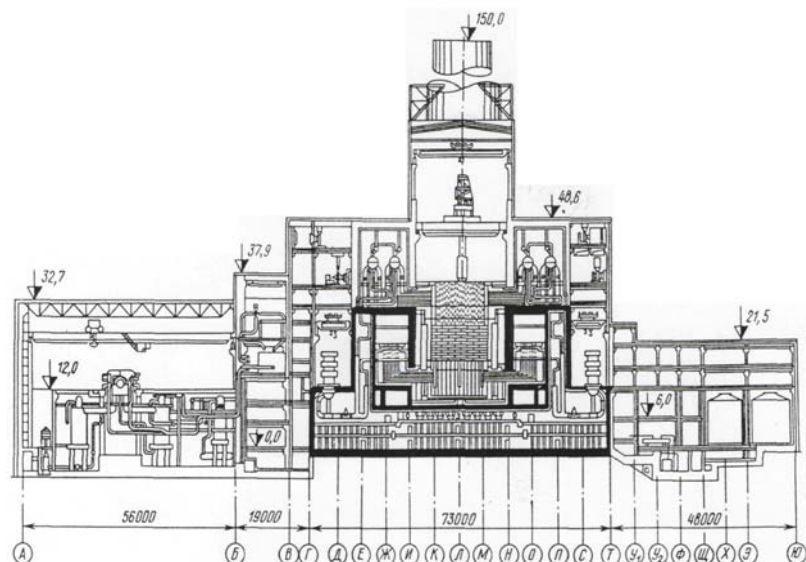


Рисунок 1 – Разрез по главному корпусу АЭС с РБМК-1000. Система локализации аварии зачернена

Жесткость плиты отражает сложную геометрическую структуру здания, и поведение бетона во времени по кинетической теории ползучести бетона [3]. Предлагается построение дифференциального уравнения этой плиты, основанное на предпосылках теории плит средней толщины и плит четвертого порядка по координатам.

Получено точное решение принятого за основу дифференциального уравнения четвертого порядка в двойных тригонометрических рядах. Краевые условия по моментам удовлетворяются в интегральной форме, что не влияет на величины усилий в центральной области плиты. Построены графики усилий в центральной области плиты. Приведем рекомендации по армированию железобетонных конструкций здания.

На основе разработанного прикладного метода в диссертации получены оптимальные значения коэффициентов армирования монолитной железобетонной фундаментной плиты здания АЭС на упругом основании с учетом ползучести бетона.

В задаче имеется две оси симметрии и ортогональное, вдоль осей симметрии расположение арматуры, учет сдвигов не требуется и условие прочности записывается в виде

$$(\mu_x R_s - \sigma_x)(\mu_y R_s - \sigma_y) \geq 0. \quad (5)$$

Поскольку предполагается, что $\sigma_x > 0$ и $\sigma_y > 0$, то условие (34) можно представить в виде

$$\mu_x R_s - \sigma_x \geq 0, \mu_y R_s - \sigma_y \geq 0, \quad (6)$$

где R_s - расчетное сопротивление арматуры;

μ_x, μ_y - коэффициенты армирования по осям X и Y;

σ_x, σ_y - расчетные напряжения.

Неравенства (6) используются для подбора коэффициентов армирования по найденным из расчета напряжениям. Для более точного определения коэффициентов армирования учитывается усадку, которая приводит к сжатию арматуры. В условиях такой деформации уравнение равновесия элемента железобетонной плиты имеет вид

$$\sigma_s = \mu \sigma_s, \quad (7)$$

где σ_s, σ_s - соответственно напряжения в бетоне и арматуре.

Условие совместности деформаций записывается в виде

$$-\frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{(1 + \tilde{K})\sigma_s}{E_s} - \varepsilon, \quad (8)$$

где $\varepsilon > 0$ - деформация усадки

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 - e^{-t/\tau_v}) \quad (9)$$

и где $\varepsilon_0 = 3 \cdot 10^{-4}$.

Решение в изображениях дает

$$\bar{\sigma}_s = \frac{1}{1 + \mu g} \cdot \frac{E_s \bar{\varepsilon}}{1 + \lambda \tilde{K}}, \quad (10)$$

где $g = E_s / E_s$ отношение модулей упругости арматуры и бетона.

Для принятой в диссертации марки бетона $g = 4$. Переходя к оригиналам при $t \rightarrow \infty$ по теореме Пэли-Винера получаем

$$\sigma_s = \frac{-E_s}{1 + \mu g} (1 - \lambda K_\infty) \varepsilon_0. \quad (11)$$

На основании этой же теоремы при $t \rightarrow \infty$ нужно положить $J=1$, $\tilde{C}_x = C_{x\infty}$, $\tilde{C} = C_\infty$, где $C_{x\infty} = C_x \pi_\infty$, $C_\infty = \pi_\infty C$, причем с учетом возраста бетона в момент начала загрузки в соответствующих формулах следует принимать $\pi_\infty = 1,44$, и $\pi_\infty = 2$.

Напряжения в арматуре от усадки являются всегда сжимающими и определяются по формуле (11) при $K_\infty = 1$, так как усадка начинается сразу же после закладки бетона в еще молодом возрасте, тогда

$$\sigma_s = -\frac{1 - E_s \varepsilon_0}{(1 + \mu g)^2}. \quad (12)$$

Напряжения в фундаментной плите от общей деформации здания СЛА являются растягивающими, поэтому условия прочности можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \mu_x \left[R_s + \frac{E_s \varepsilon_0}{(1 + \mu_x g)^2} \right] - \sigma_x &\geq 0, \\ \mu_y \left[R_s + \frac{E_s \varepsilon_0}{(1 + \mu_y g)^2} \right] - \sigma_y &\geq 0, \end{aligned} \quad (13)$$

Поскольку сжимающие напряжения от усадки фактически повышают расчетное сопротивление при растяжении. Подбор арматуры по формулам (33) производится последовательными приближениями. Пусть например $\sigma_x = 2,2$ МПа, $\sigma_y = 1,7$ МПа, $R_s = 210$ МПа, $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\varepsilon_0 = 3 \cdot 10^{-4}$, тогда в первом приближении

$$\begin{aligned} \mu_x (210 + 2 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{-4}) - 2,2 &\geq 0 \\ \mu_y (210 + 2 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{-4}) - 1,7 &\geq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Откуда $\mu_x \geq 0,0081$, $\mu_y \geq 0,0065$ и второго приближения не требуется. Без учета усадочных напряжений $\mu_x = 0,0105$, $\mu_y = 0,081$ т.е. на 29% и 25% выше соответственно.

Выводы. На основе адаптированного варианта кинетической теории ползучести разработан расчетно-экспериментальный метод, позволяющий учитывать эффекты ползучести и усадки бетона при расчете на прочность крупногабаритных элементов монолитных железобетонных конструкций, рассматриваемых как плиты средней толщины на упругом основании.

Проведен анализ деформирования грунтовых оснований на основе современных теоретических представлений с учетом применения адаптированного применительно к бетону варианта кинетической теории ползучести.

На основе разработанного расчетно-экспериментального метода определены оптимальные значения коэффициентов армирования, обеспечивающие прочность фундаментной плиты при ее деформации совместно со зданием АЭС от действия собственного веса здания и веса технологического оборудования. Установлена возможность существенного, до 30%, снижения значений коэффициентов армирования за счет учета деформации усадки бетона.

Список литературы

1. Тараторин, Б. И. Прочность конструкций атомных станций - М. : [б.и.], 1989. - 248 с.
2. М. М. Атаров, Ю. Д. Насонкин Примеры решения задач по сопротивлению материалов. Ч.1- М.: МИСИ,1990.-136 с.
3. Рыков В.С., Дьячков Н.И., Жупиков И.И., Мельников А.М. Расчет предварительно напряженных железобетонных элементов конструкций с учетом ползучести бетона. - Проблемы машиностроения и автоматизации, 2002, № 2, С. 89-91.

О.Мажейка, А.Чайковский, С.Маркович, А.Лутай

У статті розглянуто питання застосування великогабаритних будівельних залізобетонних конструкцій, Запропонована методика розрахунку плит і фундаментів з врахуванням деформативності будівельних елементів, проведений розрахунок коефіцієнта армування фундаментної плити для будівлі АЕС.

O.Mazheyka, A.Chaykovskiy, S.Markovich, A.Lutay

The questions of application of large overall build reinforced concrete constructions are considered in the article, the method of calculation of flags and foundations is Offered taking into account deformations of build elements, the calculation of coefficient of reinforcing of fundamental flag is conducted for building of AES.

Одержано 01.09.10